

dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. nadzw. UTH Radom
Katedra Fizyki, Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny
im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu

Recenzja pracy doktorskiej

Modelowanie charakterystyk magnesowania amorficznych rdzeni dwuosiowych sensorów transduktorowych

Autor: mgr inż. Piotr Frydrych
Promotor: dr hab. inż. Roman Szewczyk, prof. PW
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Jacek Salach

prowadzonej na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Frydrycha została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 17.04.2019.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena tematu i celu pracy

Oceniana rozprawa doktorska ma charakter interdyscyplinarny. Wyróżnić w niej można zarówno elementy z zakresu budowy maszyn, inżynierii materiałowej, fizyki magnetyzmu i materiałów magnetycznych, elektroniki, technologii elektronowej, magnetostatycznych symulacji komputerowych, zaawansowanych metod numerycznych i statystycznych, przetwarzania sygnałów, jak również miernictwa wielkości magnetycznych.

Ze względu na finalny efekt konstrukcyjny i potencjalne zastosowania przemysłowe należy stwierdzić, że tematyka pracy mieści się jednoznacznie w dyscyplinie naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn”, którą wskazano przy otwieraniu przewodu doktorskiego.

Zasadniczy temat pracy dotyczył opracowania modelu charakterystyk magnesowania anizotropowych, planarnych rdzeni magnetycznych, który pozwalałby na modelowanie charakterystyk pomiarowych dwuosiowych sensorów transduktorowych. Końcowy model histerezy magnetycznej, choć oparty na znanym podejściu Preisacha został znacząco rozwinięty, a osiągnięte efekty stanowią najbardziej zaawansowaną część doktoratu.

Ponadto w ramach pracy Doktorant zaprojektował i wykonał miniaturowe, dwuosiowe sensory transduktorowe w technologii płytek drukowanych o grubości dwóch milimetrów i jednego milimetra. Ramkowe rdzenie ferromagnetyczne zostały wyprodukowane z materiałów amorficznych Metglas 2826 MB3 (na bazie żelaza i niklu dodatkiem molibdenu i boru) i Metglas 2714A (na bazie kobaltu z dodatkami żelaza, niklu, krzemu i boru).

Doktorant oprócz przeprowadzenia badań naukowych i interpretacji wyników, zadbał również o warsztat pracy eksperymentalnej i teoretycznej (symulacyjnej). Praca doktoranta ma potencjał aplikacyjny a jej wykonanie wymagało kooperacji z podmiotami zewnętrznymi. Temat pracy jest ważny i aktualny zarówno z poznawczego punktu widzenia (badania podstawowe) jak i ze względu na możliwe zastosowania. Szeroki zakres wykonanych zadań oraz liczba i jakość publikacji wskazuje na duże umiejętności badawcze Doktoranta i świadczy o rozległym spektrum Jego zainteresowań.

3. Merytoryczna ocena pracy

Jednostronicowe streszczenie trafnie informuje o wszystkich zadaniach wykonanych w ramach doktoratu. Brakuje jedynie bardziej wyrazistego wyeksponowania zasadniczych celów pracy.

We Wstępie Autor nakreślił w skrócie historię odkryć z zakresu fizyki magnetyzmu, modelowania histerezy magnetycznej oraz konstrukcji i zastosowań przetworników transduktorowych. Ponadto Doktorant wyspecyfikował wyzwania dotyczące optymalizacji konstrukcyjno-materiałowej nowych rdzeni ferromagnetycznych w transduktorach.

W Rozdziale 1. pracy opisane zostały szczegółowo cele pracy, przy czym jako nadrzędny cel naukowy Autor wskazał opracowanie dwuwymiarowego, anizotropowego, dynamicznego modelu histerezy magnetycznej rdzeni ze stopów amorficznych. Autor uzasadnił taki wybór faktem, że istniejące dotąd modele histerezy rdzeni stosowanych w transduktorach miały charakter fenomenologiczny, natomiast zamierzeniem Autora było opracowanie modelu powiązanego z parametrami fizycznymi materiału rdzenia i zachodzącymi w nim procesami magnesowania, jaka również uwzględnienie odmagnesowania wynikającego z określonego kształtu rdzenia. Za cel użytkarny pracy Autor obrał wykonanie miniaturowych dwuosiowych sensorów transduktorowych z rdzeniami z wybranych materiałów amorficznych, które ze względu na technologię wytwarzania wykazują anizotropię parametrów histerezy magnetycznej. Celem dopełniającym było z kolei porównanie wyniki modelowania charakterystyk użytkowych sensorów transduktorowych z wynikami pomiarów testowych sensorów.

Rozdziale 2. Doktoratu został poświęcony solidnemu przeglądowi stanu wiedzy popartego niezmiernie trafnym, bogatym i bardzo aktualnym doбором pozycji literaturowych. Autor wymienił najważniejsze zastosowania sensorów transduktorowych oraz wymienił szereg rozwiązań stosowanych w konstrukcji sensorów transduktorowych. Zostały wymienione podstawowe klasy materiałów używanych do rdzeni w transduktorach i technologie ich wytwarzania. Omówione zostały różne geometrie rdzeni uzwojeń (magnesujących i pomiarowych – w tym – dla przypadku kompensacyjnych detektorów zera) oraz technologie wytwarzania i sposoby miniaturyzacji transduktorów. Na stronie 30 Autor pisze, że „Typowym sygnałem wyjściowym z sensora transduktorowego jest amplituda drugiej lub czwartej harmonicznej przebiegu napięciowego [64]. Dla małych wartości zewnętrznych pól magnetycznych są one w przybliżeniu proporcjonalne do wartości pola mierzonego [64].” Sądzę, że w tym przypadku samo powołanie się na literaturę jest niewystarczające. Rozdział 2. byłby doskonałym miejscem, by wyjaśnić od podstaw zasadę działania sensora transduktorowego i przedyskutować kwestię nieliniowości odpowiedzi w punkcie pracy o największej czułości. Takie uzupełnienie wiedzy ogólnej o transduktorach powinno zostać uwzględnione podczas publicznej obrony pracy doktorskiej w części dotyczącej pytań i uwag od recenzentów.

W kolejnych podrozdziałach Rozdziału 2. pracy Autor przedstawił bardzo wnikliwie przegląd istniejących modeli histerezy magnetycznej poczynając od historycznych początków (model Isinga i Heisenberga), poprzez podstawowe wersje modeli Stonera-Wohlfarta, Jilesa-Athertona i Preisacha, aż po ich wzajemnie się uzupełniające, rozbudowane warianty. Podczas obrony Doktorant powinien odnieść się do formuły (1), która miała opisywać hamiltonian energii swobodnej w Isinga i Heisenberga. Otóż nie jest uzasadnione oczekiwać

na poziomie mikroskopowym bardzo istotnej anizotropii oddziaływań wymiennych par spinów w kierunku równoległym i prostopadłym do warstwy magnetycznej. Znacznie bardziej istotne byłoby uwzględnienie „jednospinowej” energii anizotropii magnetycznej, która może być inna dla każdego z trzech kierunków (zwłaszcza w taśmach amorficznych wykonanych techniką melt-spinningu). To właśnie brak uwzględnienia energii anizotropii magnetycznej był podstawowym powodem braku możliwości odtworzenia histerezy magnetycznej w ramach wspomnianych modeli. Kwantowy hamiltonian (1) uzupełniony o człon elementarnej energii anizotropii magnetycznej (odniesionej do jednego spinu – nie do wektora magnetyzacji, jak w modelu Stonera-Wohlfarta), stanowi podstawę symulacji mikromagnetycznych, które są znacznie bardziej zaawansowanym narzędziem niż symulacje metodą elementów skończonych (FEM). W podsumowaniu modeli pętli histerezy zabrakło przeglądu istniejącego oprogramowania do symulacji mikromagnetycznych, jak również uzasadnienia wyboru własnego remedium na niedoskonałości metody FEM w postaci metody momentów magnetycznych. Zwięźle uzupełnienie tego braku powinno zostać podane podczas obrony.

Rozdział 3. „Opracowane miniaturowe dwuosiowe sensory transduktorowe” pokazuje imponujący efekt pracy inżynierskiej Doktoranta, której efektem są zarówno wysokiej jakości miniaturowe rdzenie ramkowe wykonane techniką fotolitografii, jak i kompletne przetworniki transduktorowe w konfiguracji Vacquier’a wykonane na płycie drukowanej o grubości dwóch milimetrów i jeden milimetr. Szkoda jednak, że autor nie podał wyczerpującego uzasadnienia wyboru określonych technik wytwarzania (rdzeni i całych transduktorów) z bogatej palety możliwości opisanych w poprzednim rozdziale. Stwierdzenie że „Taśmy amorficzne są kruche, z tego powodu nie było możliwe zastosowanie metod mechanicznego wykrawania rdzeni z taśmy. Prowadziłoby ono do powstawania mikropęknięć na krawędziach rdzenia i przez to do zwiększenia odmagnesowania” jest błędne ponieważ właśnie taśmy amorficzne na bazie żelaza wytworzone techniką melt-spinningu są jednymi z najbardziej elastycznych i wytrzymałych materiałów na bazie żelaza. Być może zatem Doktorantowi chodziło nie o taśmy amorficzne lecz o taśmy nanokrystaliczne – powstające przez odpowiednie wygrzewanie amorficznych prekursorów. W wyniku procesu nanokrystalizacji polepszają się i tak już bardzo dobre miękkie właściwości magnetyczne – w szczególności jest możliwe zredukowanie do zera magnetostrykcji, jeśli znak stałej magnetostrykcji ziaren jest przeciwny do znaku stałej magnetostrykcji matrycy amorficznej. Generalnie, zagadnienie wpływu efektów magnetosprężystych na działanie transduktorów oraz ich rola w modelu histerezy zostały potraktowane w pracy dość pobieżnie. Podczas obrony bardzo wskazane byłoby podanie uzasadnienia takiego podejścia i doprecyzowanie rodzaju użytych materiałów na rdzenie.

W dalszej części rozdziału 3, Autor zaprezentował dobrze przemyślany układ pomiarowy przeznaczony do testowania skonstruowanych przetworników transduktorowych oraz wykonane za jego pomocą charakterystyki użytkowe transduktorów. Załączone wykresy dla przypadku rdzeni z dwóch różnych materiałów przedstawiają zależność amplitudy drugiej harmonicznej sygnału z uzwojenia pomiarowego od zewnętrznego, stałego pola magnetycznego wytworzonego przez cewki Helmholtza (nie „Helmholza” – jak napisano na schemacie układu pomiarowego) w kierunku X oraz Y ramki rdzenia. Szkoda, że ani pod wykresami ani w tekście rozdziału nie zostało wyjaśnione znaczenie symbolu „I”, który faktycznie oznaczał amplitudę sinusoidalnego prądu magnesującego. Podczas obrony Doktorant powinien wyjaśnić, czy były podejmowane próby oszacowania (pomiarowego lub obliczeniowego) amplitudy pola magnesującego, które odpowiadało przyjętym wartościom prądu magnesującego finalnego transduktora. W szczególności istotne jest to, jak

wspomniana amplituda pola magnesującego miała się do wartości pól mierzonych i jaki był „punkt pracy” transduktora na pętli histerezy rdzenia. Doktorant powinien wyjaśnić, czy pola magnesujące uzyskiwane w opisanym w dalszej części pracy układzie do pomiaru pętli histerezy rdzeni ramkowych są porównywalne z tymi, które generuje uzwojenie magnesujące docelowego transduktora. Za niezbyt fortuny – lub niedostatecznie uzasadniony – należy uznać wybór „średniego odchylenia od linii prostej” jako miary nieliniowości charakterystyki użytkowej transduktora – głównie przez sam fakt, że do punktów, które nie układają się na linii prostej była dopasowywana linia prosta. Szkoda, że nie pokazane zostały graficznie efekty tych dopasowań. Generalnie jednak lepszym rozwiązaniem byłoby dopasowanie kombinacji funkcji liniowej z członem kwadratowym. Niezależnie od tych niedoskonałości analizy, same charakterystyki dostarczają bardzo przekonujących argumentów, że taśmy amorficzne (lub nanokrystaliczne) powodują silną anizotropię charakterystyki transduktorów dla kierunku zgodnego i prostopadłego do kierunku odlewania taśm w procesie melt-spinngu. Widoczne są różnice zarówno w czułości jak i nieliniowości charakterystyk. Niestety w Rozdziale 3 nie podano uzasadnienia, dlaczego zdecydowano się na pomiar charakterystyk użytkowych transduktorów jedynie dla częstotliwości przebiegu magnesującego o wartości 1 kHz, podczas, gdy pomiary pętli histerezy rdzenia ramkowego za pomocą dedykowanego układu pomiarowego przeprowadzono dla kilku różnych częstotliwości. W następującym fragmencie niniejszego rozdziału wkraść się błąd: „Rdzenie o mniejszej przenikalności, co może wydawać się zaskakujące pozwalają na uzyskanie niższej czułości. Odwrotna zależność pomiędzy przenikalnością, a czułością wskazuje na istotny wpływ odmagnesowania rdzenia, co zostanie szczegółowo omówione w rozdziale 5” – zapewne doktorantowi chodziło o rdzenie o „większej przenikalności”. Autor stwierdził ponadto, że „Porównanie parametrów sensorów przedstawionych w tabelach 4 i 5 z tabelą 3 zawierającą zestawienie parametrów magnetycznych stopów rdzeni wskazuje na niewielki wpływ na charakterystykę wartości natężenia pola koercji, jak i indukcji nasycenia.” Ta dość zaskakująca konstatacja być może wydałaby się bardziej oczywista, gdyby doktorant przedstawił w tym miejscu pracy jakiś prosty, analityczny model, który wiązałby kształt histerezy magnetycznej rdzenia z końcową charakterystyką użytkową przetwornika transduktorowego. Warto jednak podkreślić, że to zagadnienie zostało potem szczegółowo rozpatrzone w ramach różnych modeli numerycznych w Rozdziale 7 pracy.

Rozdział 4 można uznać za najważniejszy z punktu widzenia samego tytułu niniejszej rozprawy doktorskiej, ponieważ dotyczy opracowania modelu charakterystyk magnesowania rdzeni magnetycznych sensorów transduktorowych. Należy przyznać, że Doktorant tę część pracy przygotował szczególnie starannie i profesjonalnie. Jako punkt wyjścia zdecydował się przyjąć model Preisacha wskazując na związek występujących w nich parametrów z parametrami uzyskiwanymi przy pomocy coraz bardziej powszechnie stosowanej metody First Order Reversal Curve (FORC). Doktorant potraktował histerezę jako efekt złożenia elementarnych histerez prostokątnych (histeronów) na „płaszczyźnie Preisacha”, której jedna z osi przedstawia natężenie pola przemagnesowania (traktowane jako natężenie pola koercji pojedynczego histeronu), a druga obrazuje pola oddziaływań pomiędzy histeronami. Łączna gęstość prawdopodobieństwa pól przemagnesowania i pól oddziaływania została opisana dwuwymiarowym rozkładem Cauchego, który w dalszej części został dodatkowo złożony z rozkładem lognormalnym. Ponadto wprowadzono szereg zostało szereg modyfikacji i udoskonaleń modelu podstawowego modelu Preisacha. Zostały m.in. zdefiniowane i zastosowane operatory przesunięć ścian domenowych i obrotów domen, co pozwoliło uogólnić model skalarny na przypadek wektorowy. Doktorant powinien jednak wyjaśnić czy użyte również kilkakrotnie określenie „obroty ścian domenowych” miało być tożsame z określeniem „obroty domen”. W celu opisanego anizotropii rdzenia uwzględniono różnicę

energii potrzebnej do przemagnesowania materiału w różnych kierunkach. Finalnym etapem konstrukcji modelu była jego dyskretyzacja i implementacja w postaci macierzowej. Bardzo szeroko została przedyskutowana w ramach przyjętego modelu kwestia pamięci historii magnesowania – m.in. na przykładzie rozmagnesowywania gasnącym przebiegiem zmiennym w wyniku którego wypadkowe namagnesowanie jest równe zero, ale stan układu różni się od tego, który uzyskuje się poprzez rozmagnesowania po podgrzaniu powyżej temperatury Curie. Docelowy model statyczny histerezy wymagał podania 6 parametrów: współczynnika skalującego (polaryzacji nasycenia), mediany rozkładu natężenia pola koercji, odchylenia standardowego natężenia pola koercji, szerokości połówkowej siły oddziaływań, współczynnika anizotropii oraz nachylenia osi łatwego magnesowania. W celu znalezienia tych parametrów zastosowano procedurę dopasowania modelowych krzywych histerezy magnetycznej do punktów eksperymentalnych, poprzez simplektyczną minimalizację residuum χ^2 skalowanego współczynnikami determinacji Pearsona. Warto podkreślić, że dopasowywanie krzywych, których nie da się opisać gotowym wzorem analitycznym i są odtwarzane w wyniku procedury symulacyjnych, jest bardzo złożonym zadaniem w sensie programistycznym i wymagającym pod względem numerycznym. Z tego zadania Doktorant wywiązał się doskonale implementując całościowy pakiet procedur w Matlabie. Jakość uzyskanych dopasowań statycznych dla przypadku rdzeni wykonanych z kilku wybranych materiałów amorficznych była wręcz imponująca. Zabrakło jedynie oszacowania niepewności pomiarowych wyznaczonych parametrów. Kolejnym krokiem rozwojowym modelu było przejście do przypadku dynamicznego. Najważniejszym etapem było wprowadzenie tzw. pola efektywnego z polem strat wynikającym z powstawania prądów wirowych, jako oczywistej konsekwencji prawa indukcji Faraday'a. Doktorant powinien jednak przeanalizować jednostki w podanej formule (63), która wydaje się niespójna pod względem wymiarowym. Uwzględnione zostały również inne efekty dynamiczne, min.: starty energii spowodowane przesuwaniem się ścian domenowych, jak również straty oporowe na cewkach magnesujących i pomiarowych. Podobnie jak w przypadku statycznym model dynamiczny został przetestowany poprzez dopasowanie do punktów eksperymentalnych dla wybranego materiału rdzenia i częstotliwości 780 Hz. Jakość dopasowania była bardzo zadowalająca, przy czym wartości parametrów z modelu statycznego nie zostały zmieniane, a wyznaczono wartości dodatkowych parametrów strat występujących w modelu dynamicznym.

Rozdział 5 pracy został poświęcony optymalizacji kształtu rdzeni ramkowych metodą momentów magnetycznych. Implementacja w Matlabie samej metody momentów magnetycznych do geometrii planarnej rozpatrywanych rdzeni została przedstawiona bardzo szczegółowo z licznymi odwołaniami do artykułów Promotora i Doktoranta. Zabrakło jedynie bardziej fundamentalnej referencji, która objaśniałaby fizyczne podstawy metody (np. O. Chadebec, J.-L. Coulomb, F. Janet, "A review of magnetostatic moment method", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO. 4, APRIL 2006). Zastosowana metoda okazała się znacznie bardziej efektywna numerycznie od metody elementów skończonych (FEM) w przypadku płaskich rdzeni i pozwoliła mniejszym kosztem obliczeniowym wyznaczyć m.in. rozkład namagnesowania na przekroju rdzenia. Za jej pomocą dokonano również optymalizacji geometrii rdzenia, wyznaczając najbardziej korzystny stosunek szerokości rdzenia do długości jego boku, gwarantujący minimalne odmagnesowanie, po przyłożeniu zewnętrznego pola.

W rozdziale 6 zebrano wszystkie elementy budujące całościowy model charakterystyk użytkowych czujnika transduktorowego: modelu statycznego histerezy rdzenia, modelu dynamicznego histerezy rdzenia dla wyższych częstotliwości, modelu rozkładu pola magnetycznego i namagnesowania w rdzeniu oraz modelu czujnika transduktorowego.

Ponadto wykonano szczegółowe obliczenia wartości pola w rdzeniu sensora i napięcia zaindukowanego w uzwojeniach. Omówiona też została metoda detekcji koherentnej do demodulacji sygnału AM, jak również metoda największej wiarygodności do analizy próbek sygnału rzeczywistego (zszumionego), przy czym wykazano, że zarówno zmiany zewnętrznego pola jak szumy Barkhausena są stosunkowo mało istotne (uśredniają się praktycznie do zera).

Rozdział 7 można uznać za zwieńczenia wysiłków Doktoranta, ponieważ przedstawia w nim efekt modelowania konkretnego czujnika transduktorowego z rdzeniem ramkowym wykonanym z konkretnego materiału amorficznego. Przebiegi sygnałów na uzwojeniach pomiarowych przewidziane przez model bardzo dobrze zgadzają się z przebiegami eksperymentalnymi (mierzonymi), co należy uznać za wielki sukces prac badawczych i konstrukcyjnych Autora. Oprócz tego wyznaczone zostały końcowe charakterystyki użytkowe modelowanego transduktora dla obydwu kierunków magnesowania oraz parametry czułości, nieliniowości i niepewności. Niekwestionowaną zaletą zaproponowanego przez Doktoranta rozwiązania jest fakt, że aby prawidłowo przeprowadzić symulacje charakterystyk transduktora wystarczy do modelu wprowadzić łatwo dostępne (np. w kartach katalogowych) parametry histerezy rdzenia. Ogranicza to potrzebę wykonywania dedykowanych pomiarów w samym układzie transduktora, a przede wszystkim w ogóle eliminuje konieczność konstruowania czujnika, w celu weryfikacji i optymalizacji jego charakterystyk użytkowych.

W rozdziale 8 Autor krótko podsumował swoją pracę i sformułował wnioski końcowe. Jest to swego rodzaju autorecenzja pracy, z którą w znacznym stopniu należy się zgodzić. Autor zwraca uwagę na fakt rozwiązania problemu badawczego i osiągnięcia wszystkich założonych celów (które zostały wymienione w rozdziale 1), zarówno dotyczących modelowania histerezy magnetycznej anizotropowych rdzeni ramkowych oraz charakterystyk użytkowych transduktorów, jak i konstrukcji samych przetworników. We wnioskach Autor wypunktował fakt, że dzięki wszechstronności i jakości opracowanego modelu możliwa jest optymalizacja parametrów czujników transduktorowych już na etapie ich projektowania bez potrzeby wykonywania kolejnych wersji próbnych. Doktorant zebrał w podsumowaniu wyniki takiej przykładowej optymalizacji podając najbardziej korzystne wartości amplitudy prądu sterowania, natężenia pola koercji rdzenia, natężenia pola magnetycznego nasycenia oraz stosunku szerokości rdzenia do długości jego boku. W mojej opinii zabrakło jednak porównania parametrów użytkowych skonstruowanych i modelowanych transduktorów z komercyjnymi czujnikami pola magnetycznego (nie tylko transduktorowymi), które obecnie są dostępne na rynku. Oczekuję, że takie porównanie zostanie przedstawione podczas obrony.

Krótki rozdział 9 wskazuje kierunki dalszych prac, które potencjalnie mogą być podjęte w przyszłości. Autor planuje skupić się przede wszystkim na doskonaleniu modelu pętli histerezy, tak by rozkłady pól przemagnesowania i pól oddziaływań, które są fundamentalne w podejściu Preisacha, były lepiej powiązane z mierzalnymi parametrami rdzenia. Będzie to wymagało dalszych badań o charakterze materiałowym m.in. przy użyciu pomocą mikroskopu polaryzacyjnego (efektu Kerra) oraz histerezografu do precyzyjnych pomiarów pętli histerezy. Autor wspomina również o potrzebie optymalizacji użytych algorytmów numerycznych w celu poprawienia ich efektywności. Ponadto Doktorant wskazał na konieczność rozpatrzenia szerszej klasy materiałów do konstrukcji rdzenia w dalszej perspektywie komercjalizacji zoptymalizowanych czujników transduktorowych. Zostały też podane przykłady innych możliwości zastosowań opracowanego modelu – min. w procesie optymalizacji elementów indukcyjnych w urządzeniach konwersji mocy.

4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Podział rozprawy doktorskiej na rozdziały jest logiczny i przemyślany.

Praca napisana jest na ogół poprawną polszczyzną, choć Autor nie uniknął zbyt daleko idących skrótów myślowych i żargonu specjalistycznego (np. we Wstępie użyto niejasnego sformułowania „kształtu natężenia pola magnesującego” a w Rozdziale 4 – „siły oddziaływań”).

Wersja angielska streszczenia oddaje w pełni treść pierwowzoru polskiego i jest napisana poprawnym językiem w niezmiernie skondensowanym, naukowym stylu.

Tekst praca zawiera stosunkowo nieliczne błędy literowe i interpunkcyjne oraz mankamenty formatowania, przy czym nie utrudniają one w poważnym stopniu lektury rozprawy.

Zapisane formuły są na ogół czytelne, choć nie zawsze łatwo znaleźć opis wszystkich symboli w pobliżu danej formuły. Jak już wspomniano, we wzorze (63) nie zgadzają się jednostki. Z kolei formuła (62) jest typograficznie błędna, ponieważ zawsze reprodukowałaby zerową wartość wyniku.

Tekst pracy został uzupełniony przez bogaty materiał ilustracyjny. Na uwagę zasługuje wysoka jakość i estetyka wykresów eksperymentalnych i modelowych (w tym charakterystyk kierunkowych i wykresów powierzchniowych 3D), schematów blokowych oraz zdjęć elementów układu. Pewne zastrzeżenia można mieć do wykresów na Rys. 28-30, w przypadku których nie wiadomo, czy linie ciągłe to tylko połączenia między punktami, czy też krzywe teoretyczne dopasowywane do punktów doświadczalnych.

Spis literatury jest bardzo obszerny i tematycznie trafny – liczy 150 pozycji, wśród których znajdują się artykuły, książki i rozprawy doktorskie zarówno z czasów historycznych, jak i najbardziej aktualne. Nie brakuje artykułów z najlepszych zagranicznych czasopism – w tym – autorstwa światowych autorytetów z dziedziny. Na szczególną uwagę zasługują artykuły z grupy badawczej, którą tworzył Promotor i Doktorant.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując szczegółową część opinii o rozprawie pana mgr inż. Piotra Frydrycha stwierdzam, że:

- Zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjął się Doktorant, zostało wybrane i sformułowane prawidłowo.
- Cel główny pracy został przez Doktoranta osiągnięty. Realizacja wszystkich, założonych celów szczegółowych pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny naukowej „Budowa i Eksploatacja Maszyn”.
- W celu rozwiązania obranego problemu badawczego Doktorant twórczo wykorzystał współczesny dorobek naukowo-techniczny w zakresie budowy maszyn, inżynierii materiałowej, fizyki magnetyzmu, elektroniki, zaawansowanych metod numerycznych, jak również miernictwa wielkości magnetycznych.

- Podczas realizacji pracy Doktorant wykazał się umiejętnością organizowania badań doświadczalnych i symulacyjnych, inicjatywą i dużą samodzielnością prowadzenia badań jak również wszechstronną wiedzą o charakterze interdyscyplinarnym.
- Uzyskane wyniki podczas realizacji badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej poszerzają wiedzę i potencjał aplikacyjny dotyczący nowej generacji transduktorowych czujników pola magnetycznego.

Stwierdzam, iż rozprawa mgr inż. Piotra Frydrycha spełnia warunki Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki, oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Podczas obrony oczekuję, że Doktorant odniesienie się do zawartych w recenzji uwag krytycznych. Większość z nich nie zmniejsza w istotnym stopniu merytorycznej wartości pracy, ponieważ dotyczą one przede wszystkim niedoskonałości samego opisu metodyki oraz sposobu prezentacji wyników badań.

Przez wzgląd na interdyscyplinarny charakter pracy, rozległość wykonanych zadań wykraczającą ponad typowe ramy doktoratu oraz na aplikacyjną wartość pracy, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Frydrycha.

Istotnym uzasadnieniem wniosku o wyróżnienie pracy należy uznać fakt, że doktorant jest autorem lub współautorem 20 publikacji naukowych, których tematyka wiąże się nieodłącznie z rozprawą doktorską. Większość artykułów została opublikowana w wysoko punktowanych czasopismach z listy JCR o światowym zasięgu. Dodatkowym atutem rozprawy jest udokumentowana współpraca Doktoranta z Instytutem Tele- i Radiotechnicznym (ITR) w Warszawie, dzięki której możliwie było zaprojektowanie i wykonanie miniaturowych, dwukierunkowych sensorów transduktorowych pola magnetycznego i dzięki której w przyszłości istnieje szansa na działania aplikacyjno-wdrożeniowe.

T. Szumieta